

***В. В. Березовская\*, Н. Н. Озерец, А. Н. Ананьин, Д. О. Бизяева,  
Д. С. Асанова***

УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

\*ber6141@yandex.ru

## ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ АЗОТА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

### АННОТАЦИЯ

Работа посвящена изучению влияния имплантации ионов азота в поверхность аустенитных коррозионностойких сталей для повышения их функциональных свойств, что является актуальной и значимой для практики задачей. В работе исследовали 4 марки аустенитных коррозионностойких сталей (02X16H10M2, 08X15AG10D2, 06X15AG9NM2 и 09X15AG9ND2) в исходном состоянии, после холодной пластической деформации и закалки с рекристаллизационным отжигом, и после имплантации ионами азота с разной дозой облучения. Установлено, что облучение ионами азота аустенитных коррозионностойких сталей можно считать эффективным способом для повышения твердости, а также условного предела текучести при эксплуатации сталей в коррозионной среде.

*Ключевые слова:* сталь, коррозионная стойкость, аустенит, имплантация ионов азота.

***V. V. Berezovskaya, N. N. Ozerets, A. N. Ananin, D. O. Bizyaeva,  
D. S. Asanova***

## INFLUENCE OF NITROGEN DOPING ON STRUCTURE AND PROPERTIES OF AUSTENITIC STEELS

### ABSTRACT

Work is devoted to studying the effect of implantation of nitrogen ions into the surface of austenitic stainless steels to improve their functional properties that is relevant and meaningful to the task of practice. Four grades of the austenitic stainless steels (02H16N10M2, 08H15AG10D2, 06H15AG9NM2 and 09H15AG9ND2) were studied after cold plastic deformation, quenching and subsequent implantation of nitrogen ions with different radiation dose. It was found that irradiation of austenitic stainless steels with nitrogen ions can be considered an effective way to increase the hardness and yield strength of steels in the operation in a corrosive environment.

*Key words:* steel, corrosion resistance, austenitic, nitrogen implantation.

В связи с большой распространенностью сталей различного типа, назначения и состава, более экономичные технологии модификации поверхности с использованием ионных и ионно-плазменных потоков находят все более широкое применение в различных областях промышленности. Вместе с традиционным использованием ионного легирования, ионные технологии интенсивно используются для повышения защитных и прочностных свойств изделий [1].

Целенаправленно выбирая атомы легирующей примеси и режимы облучения с помощью метода ионной имплантации можно обеспечить широкую гамму полезных свойств поверхностных слоев материалов. В частности, удастся достичь высокой прочности поверхностного или подповерхностного слоя, создать слой, выполняющий роль твердой смазки, повысить или понизить химическую активность поверхности, изменить концентрацию и пространственное распределение дислокаций и других дефектов структуры.

Целью данной работы является изучение влияния имплантации ионов  $N^+$  в поверхность аустенитных коррозионностойких сталей на их функциональные свойства. В работе исследовали четыре марки аустенитных коррозионностойких сталей (02X16H10M2, 08X15AG10D2, 06X15AG9NM2 и 09X15AG9ND2) после холодной пластической деформации и закалки от 1050 °С в воде и последующей имплантацией ионами  $N^+$  с разной дозой облучения.

По сравнению с традиционными методами химико-термической обработки ионная имплантация позволяет в десятки раз сократить время и резко понизить температуру обработки, производить селективную обработку отдельных участков детали. Существенным преимуществом метода является отсутствие проблем адгезии между модифицированным слоем и объемом материала. Обнаружены изменения таких свойств металлов, как коррозионная стойкость, твердость, износостойкость, усталостные характеристики при внедрении ионов металлоидов (азота, углерода, бора и фосфора) [2].

Для данного исследования была использована установка ионной имплантации по двустороннему облучению пучком газовых ионов с энергией до 40 кэВ образцов листового проката. Механические испытания образцов на одноосное растяжение проводили, согласно ГОСТ 11701-84, на воздухе и в 3,5 %-ом NaCl с использованием машины *Tinius Olsen H50KS*. Микроструктуру сталей исследовали на металлографическом инвертированном цифровом комплексе Альтами MET 1 с использованием программы анализа изображения *SIAMS 700*. Твердость определяли на приборе Виккерса при нагрузке 0,049 кН.

Микроструктура сталей в исходном состоянии: после холодной прокатки и закалки от 1050 °С в воде, приведена на рис. 1. По результатам рентгеноструктурного исследования структура сталей состояла только

из аустенита, в пределах точности метода. Проверка образцов на парамагнитность с использованием магнита показала, что образцы не намагничиваются, что также подтверждает аустенитную структуру данных сталей. Микроструктура сталей представляет собой мелкозернистый двойникованный аустенит, отличие структуры стали 09X15НАГ9Д2 от других исследуемых сталей заключается в том, что в структуре наблюдаются также волокнистые зерна, сохранившиеся после холодной пластической деформации. Очевидно, повышенное содержание меди обусловило ее выделение по границам зерен и задержку процессов рекристаллизации при нагреве под закалку (рис. 1, *г*). Наиболее прочной (особенно по  $\sigma_{0,2}$ ) является сталь 08X15АГ10Д2, в которой имеется сочетание повышенного содержания меди и азота. Медь придает дополнительную прочность сталям.

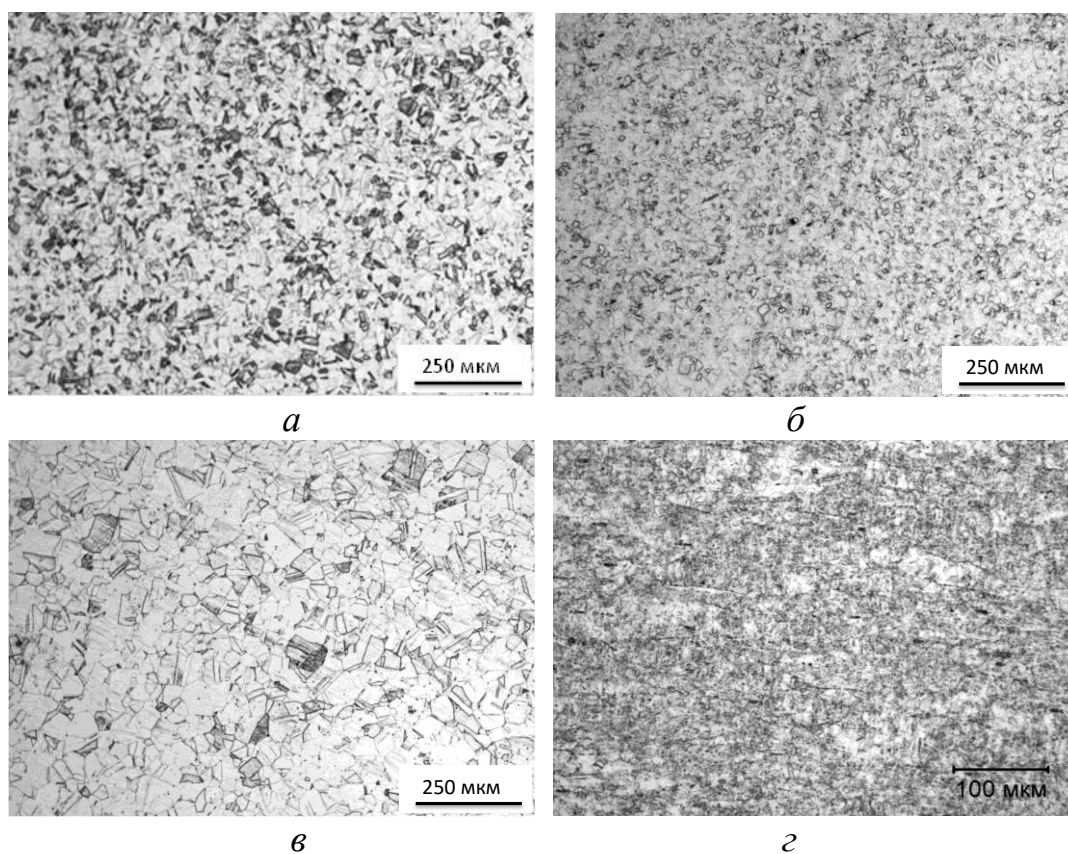


Рис. 1. Микроструктура исследуемых сталей до облучения азотом:  
*а* – 02X16Н10М2; *б* – 08X15АГ10Д2; *в* – 06X15АГ9НМ2; *г* – 09X15НАГ9Д2

Имплантацию ионов азота в исследуемые стали проводили по двум режимам: доза облучения при первом режиме составила  $4,2 \cdot 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>, доза облучения при втором режиме –  $4,2 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>.

После первого режима облучения размер зерна в стали 02X16Н10М2 составляет 19 мкм. Мелкое зерно могло образоваться в результате динамической рекристаллизации, которая не наблюдалась в исходном состоянии. Это было вызвано облучением образца, так как кроме

повышения содержания азота в стали повысилась концентрация дефектов кристаллического строения. О повышении дефектности свидетельствует и высокое значение твердости, подтверждаемое высокой плотностью дислокаций. В данном образце высокое содержание Ni, из-за чего растворимость азота ниже, чем в остальных образцах, что могло способствовать распаду аустенита. Суммарная концентрация азота в стали – 0,137 %. После первого и второго режимов облучения образец не магнитился. Таким образом, согласно полученному размеру зерна и значениям твердости после облучения по первому и второму режиму, можно сказать, что под действием нагрева при облучении по второму режиму до 250 °С в стали прошел процесс возврата.

В образце стали 08X15AG10D2 итоговая концентрация азота после первого режима облучения составляет 0,173%, после второго режима облучения – 0,263 %. Структура похожа на структуру стали 02X16H10M2: полосчатость и мелкое зерно (22 мкм), однако отличие заключается в том, что в структуре наблюдаются черные окантовки зерен и изредка темные зерна. Проверка на магнитность показала, что в структуре в результате механических испытаний образовался мартенсит деформации, после облучения по второму режиму объемная доля мартенсита увеличилась. Также в сравнении с первым режимом облучения образование мартенсита свидетельствует о повышении твердости.

Из всех изучаемых образцов сталь 06X15AG9HM2 имеет самое крупное зерно, его размер составляет 50 мкм. Итоговая концентрация азота составила 0,176 %, после второго режима облучения – 0,266 %. По сравнению с этой же маркой стали после второго режима облучения, здесь меньше мартенсита. Второй режим облучения проводился при более высокой температуре (до 250 °С), поэтому наблюдается высокая диффузия. Следует отметить большую площадь светлых участков структуры после возврата.

В стали 09X15HAG9D2 суммарная концентрация азота после первого режима облучения составила 0,143 %, после второго режима облучения – 0,233 %. В структуре заметны следы мартенсита. Размер зерна составил 25 мкм. Образец магнитился.

С повышением концентрации азота в сталях значения временного сопротивления и предела текучести увеличились по сравнению со значениями исходного состояния. Это связано с повышением концентрации дефектов кристаллического строения, связанного с имплантацией ионов азота на поверхности образцов. Также заметно повышение значений предела текучести после облучения при испытании в коррозионной среде. Влияние ионной имплантации увеличивает твердость сталей вследствие увеличения дефектности структуры.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– Показана возможность повышения предела прочности и твердости аустенитных коррозионностойких сталей на воздухе и в искусственной морской воде в 2 раза путем имплантации ионов  $N^+$ , в основном за счет повышения концентрации дефектов кристаллического строения.

– Предел текучести исследованных сталей при имплантации ионов  $N^+$  повышается, степень повышения прочности зависит от режима имплантации и состава сталей.

– Размер зерна аустенита после имплантации, которая сопровождается нагревом до 70-250 °С, во всех сталях уменьшается за счет дробления зерен при повышении плотности дислокаций.

– Облучение ионами азота аустенитных коррозионностойких сталей можно считать эффективным для повышения механических свойств при эксплуатации на воздухе и в коррозионной среде.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов К. В. Современные методы упрочнения поверхностей деталей машин / В кн. Научно-технический прогресс в машиностроении. М. : Институт машиноведения АН СССР, 1989. 286 с.
2. Овчинников В. В. Радиационно-динамические эффекты. Возможности формирования уникальных структурных состояний и свойств твердых тел // Успехи физических наук, 2008. С. 991–1001.